

## **УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ**

***Вострецова А.В., Карпий С.В., Будовских Е.А.***

*Руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Громов В.Е.*

Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк

e-mail: [vostretsova\\_av@physics.sibsiu.ru](mailto:vostretsova_av@physics.sibsiu.ru)

В настоящей работе проанализированы основные особенности и возможности электровзрывного легирования (ЭВЛ) – нового способа упрочнения поверхности металлов и сплавов.

Экспертные оценки показывают, что упрочняющая обработка поверхности металлов и сплавов с использованием концентрированных потоков энергии в ближайшие годы будет развиваться ускоренными темпами. Это связано с высоким уровнем формируемых свойств и экономической эффективностью такой обработки, что обуславливает высокий интерес к разработке ее новых способов. Концентрированные потоки энергии формируются тепловыми источниками, позволяющими обеспечить на облучаемой поверхности поглощаемую плотность мощность  $\sim 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> и выше. Как видно из диаграммы (рис. 1), при использовании технологических лазеров с непрерывным излучением увеличение диаметра пучка с целью увеличения площади упрочняемой поверхности приводит к существенному уменьшению поглощаемой плотности мощности. Это ограничивает их возможности для осуществления поверхностного легирования. Более высоким коэффициентом преобразования энергии обладают электронно-лучевые источники, поэтому при их использовании для обработки поверхности с оплавлением диаметр пучка может быть увеличен до 1 см. Максимальное увеличение площади достигается при обработке поверхности импульсными плазменными струями и электронными пучками. Обработка с использованием импульсных, лазерных, электронных, плазменных и других источников вызывает нагрев и охлаждение материала основы с высокими скоростями, позволяет достигать оплавления и осуществлять жидкофазное легирование поверхностных слоев.

Одним из перспективных импульсных способов упрочнения является ЭВЛ, которое осуществляется воздействием на поверхность плазменных струй, формируемых при электрическом взрыве проводников [1]. Обработка приводит к оплавлению и насыщению легирующими добавками поверхностных слоев общей глубиной до 20–40 мкм. При этом диаметр зоны легирования достигает 3 см. Особенности структурно-фазовых состояний при ЭВЛ обусловлены совокупностью взаимосвязанных физических процессов на облучаемой поверхности. Одна из них состоит в том, что нагрев и насыщение расплава легирующими элементами происходит в условиях высокого давления со стороны ударно-сжатого слоя, формируемого при отражении струи от поверхности. Это приводит к развитию гидродинамических неустойчивостей,

приводящих к насыщению расплава до высоких концентраций на всю глубину вплоть до границы с основой, а также его охлаждение с высокой скоростью при теплоотводе как в объем материала, так и с его поверхности вследствие перегрева и вскипания после окончания импульса. Формируемая при этом структура обладает большой неравновесностью. В связи с этим следует ожидать, что свойства модифицированных при ЭВЛ поверхностных слоев могут быть улучшены при использовании того или иного вида дополнительного воздействия.

Рис. 1. Диаграмма “плотность мощности – диаметр зоны облучения” для различных тепловых источников: ИПЛ – импульсно-периодические лазеры; ИР – искровые разряды; НЛИ – непрерывное лазерное излучение; НЭП – непрерывный электронный луч; ИПС – импульсные плазменные струи; ИСЭП – импульсные сильноточные электронные пучки; СД – сварочная дуга

Из диаграммы видно, импульсные плазменные струи электровзрывных источников и электронные пучки имеют одинаковые параметры, которые отличают их от других аналогичных инструментов воздействия на поверхность и дают возможность осуществлять комбинированную обработку, сочетающую ЭВЛ и последующее электронно-пучковое воздействие. Распределение микротвёрдости по глубине модифицированных слоёв стали 45 в отожжённом состоянии показывает, что электровзрывное алитирование и электронно-пучковая обработка без ЭВЛ приводят к близким результатам упрочнения. Двухкомпонентное ЭВЛ с использованием порошковых навесок аморфного бора и ультрадисперсного карбида кремния позволяют повысить микротвёрдость поверхности до 1425 и 1135 HV соответственно (рис. 2).

Рис. 2. Распределение микротвёрдости по глубине модифицированных слоёв стали 45 после различных видов ЭВЛ: 1 – электронно-пучковая обработка; 2 – электровзрывное бороалитирование; 3 – алитирование; 4 – алитирование с карбидом кремния. Пороги на зависимостях показывают границы зоны легирования (слева) и зоны термического влияния (справа)

Результаты исследований совместного ЭВЛ и электронно-пучкового воздействия представлены в работе [2], где показано, что дополнительная электронная обработка модифицированных слоёв, сформированных при электровзрывном алитировании стали 45, уменьшает шероховатость облучённой поверхности и увеличивает их глубину до 50 мкм при сохранении высокого уровня микротвёрдости ~800 HV. Столь сильное влияние электронно-пучковой обработки, по-видимому, обусловлено высокоинтенсивными диффузионными процессами, развивающимися вследствие неравновесного характера структурно-фазовых состояний, сформированных при ЭВЛ и вызывает необходимость модельного описания этих процессов.

1. Закономерности электровзрывного легирования металлов и сплавов / Е.А. Будовских, А.Я. Багаутдинов, А.В. Вострецова, В.Е. Громов // Известия вузов. Физика. – 2008. – №5. – С. 71–83.
2. Electroexplosive and Electron Beam Combined Treatment of AISI 1045 Steel / Yu.F. Ivanov, A.D. Teresov, S.Yu. Filimonov, N.N. Koval, E.A. Budovskih, A.V. Vostretsova, and V.E. Gromov // 9<sup>th</sup> International Conference on Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings. Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2008. С. 204–207.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантами РФФИ №№ 07-08-92100-ГФЕН\_а, 08-02-00024-а, 08-02-12012-офи*